



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y AGUA

CARRERA EN GEOCIENCIAS

Proyecto de investigación previo a la obtención del título de Ingeniero en Geociencias

**ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD AL DESLIZAMIENTO UTILIZANDO EL PROCESO DE JERARQUÍA
ANALÍTICA (AHP) EN SIG EN EL TRAMO VIAL PUYO – TENA**

Autor: Cristian Jefferson Cargua Quishpe

Tutor: Jorge Ronny Espín Campos

Tena, Julio del 2021



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

Facultad de Ciencias de la Tierra y Agua

Ingeniería en Geociencias

***Análisis de Susceptibilidad al Deslizamiento utilizando el
Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) en SIG en el tramo
vial Puyo – Tena***

Cristian Jefferson Cargua Quishpe

27 de abril del 2021, ciudad de Tena, Napo, Ecuador

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Tena, 27 de abril del 2021

Yo, Cristian Jefferson Cargua Quishpe con documento de identidad N°160050498-7, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título Análisis de Susceptibilidad al Deslizamiento utilizando el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) en SIG en el tramo vial Puyo – Tena son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en la presente investigación son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

Por la favorable atención a la presente, suscribo de usted,

Atentamente,

Firma:



Cristian Jefferson Cargua Quishpe
160050498-7

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Certifico que el trabajo de integración curricular titulado: “Análisis de Susceptibilidad al Deslizamiento utilizando el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) en SIG en el tramo vial Puyo – Tena”, en la modalidad de: proyecto de investigación en formato artículo original, fue realizado por: Cristian Jefferson Cargua Quishpe, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiam, para su entrega y defensa.

Tena, 27 de abril del 2021

Firma:

.....

Jorge Ronny Espín Campos

C.I: 160048820-7



Document Information

Analyzed document	CarguaJefferson_Tesis_Version7.0.pdf (D103090340)
Submitted	4/28/2021 5:17:00 AM
Submitted by	Jorge Ronny
Submitter email	jorge.espin@ikiam.edu.ec
Similarity	0%
Analysis address	jorge.espin.ikiam@analysis.arkund.com

Sources included in the report

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi tutor al Mgs. Ronny Espín quien con su profesionalidad, consejos y apoyo hizo posible que esta investigación se de. La situación actual de salud que vive el país ha ocasionado que este trabajo se prolongue, pero gracias a su compromiso la investigación pudo realizarse satisfactoriamente.

Agradezco al resto de docentes y personal técnico de laboratorios con quienes he compartido. Sus conocimientos y pasión por enseñar permitieron que me forme como profesional.

Agradezco a todos mis amigos y compañeros que conocí en el transcurso de esta grandiosa etapa, donde su amistad y experiencias vividas hicieron que de cierta manera llegue a este momento de mi vida.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi querido padre y mi querida madre, Luis Cargua y Rosa Quishpe. Ellos fueron el motor principal para que esta increíble etapa de mi vida pueda darse. Siento demasiado orgullo y respeto por todo lo que me han inculcado y este logro es un pequeño aporte a todo lo que han hecho por mi.

Dedico a mis hermanas, quienes de igual forma me alentaban y daban ánimos para seguir luchando por este sueño.

Dedico a mis abuelitos paternos y maternos que siempre se preocupaban por mi y siempre me alentaban y apoyaban a pesar de la distancia.

Dedico al resto de mis familiares que también estaban interesados en mi formación académica y que también me alentaban a luchar por esta meta.

Dedico a mi tutor de tesis, Mgs. Ronny Espín, quien me apoyaba y guiaba académicamente para que llegue hasta este punto.

A todos ustedes les dedico y les agradezco inmensamente.

ÍNDICE GENERAL

<i>DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD</i>	<i>II</i>
<i>CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR.....</i>	<i>III</i>
<i>AGRADECIMIENTOS</i>	<i>V</i>
<i>DEDICATORIA.....</i>	<i>VI</i>
<i>ÍNDICE GENERAL</i>	<i>VII</i>
<i>ÍNDICE DE TABLAS.....</i>	<i>VIII</i>
<i>ÍNDICE DE FIGURAS.....</i>	<i>IX</i>
<i>RESUMEN.....</i>	<i>2</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>3</i>
<i>INTRODUCCIÓN.....</i>	<i>4</i>
<i>DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....</i>	<i>6</i>
<i>MATERIALES Y MÉTODOS</i>	<i>8</i>
<i>PREPARACIÓN DE LAS CAPAS DE LAS VARIABLES DE DESLIZAMIENTO</i>	<i>10</i>
<i>CARTOGRAFÍA DE SUSCEPTIBILIDAD.....</i>	<i>17</i>
<i>RESULTADOS.....</i>	<i>19</i>
<i>DISCUSIÓN</i>	<i>23</i>
<i>CONCLUSIÓN.....</i>	<i>27</i>
<i>AGRADECIMIENTOS</i>	<i>28</i>
<i>REFERENCIAS</i>	<i>28</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Fuentes de datos usados para el estudio.</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 2. Escala fundamental de Saaty (1980).</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 3. Índice de Consistencia Aleatorio de Saaty (1980).</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 4. Matriz de jerarquización y comparación de pares de las variables y sub-variables.</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 5. Matriz de comparación de pares y ponderación final de cada variable causante de deslizamiento de tierra.</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 6. Áreas de las categorías del mapa de susceptibilidad a deslizamientos.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 7. Principales tramos de la carretera Puyo – Tena con susceptibilidad alta y muy alta a deslizamientos.</i>	<i>22</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Ubicación del sitio de estudio.</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2. Diagrama de Flujo del Estudio.</i>	<i>11</i>
<i>Figura3. Distribución de las variables en la cuenca Anzara: (a) Pendiente, (b) Formaciones Geológicas, (c) Distancia a Fallas, (d) Distancia a la Carretera, (e) Distancia a Ríos y (f) Cobertura y Uso del Terreno CUT.</i>	<i>15</i>
<i>Figura4. Capas temáticas de las variables a lo largo de la vía Puyo – Tena: (a) Pendiente, (b) Formaciones Geológicas, (c) Distancia a Fallas, (d) Distancia a la Carretera, (e) Distancia a Ríos y (f) Cobertura y Uso del Terreno CUT.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 5. Mapa LSI de Susceptibilidad al Deslizamiento usando el método AHP. Tramos de la vía Puyo – Tena.</i>	<i>23</i>

La revista al cual será sometido este artículo es: La Granja

Sección (Marcar)

Artículo científico _X_

Revisión Bibliográfica ___

Punto de vista ___

***Análisis de Susceptibilidad al Deslizamiento utilizando el Proceso de Jerarquía Analítica
(AHP) en SIG en el tramo vial Puyo – Tena***

***Landslide Susceptibility Analysis using the Analytical Hierarchy Process (AHP) in GIS in
the Puyo – Tena road section***

RESUMEN

La carretera Puyo – Tena es propensa a deslizamientos de tierra debido a la dinámica, geomorfología y materiales geológicos del sector. El presente trabajo tuvo como objetivo generar un mapa de susceptibilidad al deslizamiento enfocándose exclusivamente en esta vía. Para la presente investigación, se analizó seis variables: pendiente, formaciones geológicas, distancias (fallas, carretera y ríos) y por último la cobertura y uso de la tierra. Se jerarquizó y ponderó cada una de las variables con el proceso de jerarquía analítica para conocer sus grados de incidencia al deslizamiento. El mapa de susceptibilidad al deslizamiento fue el resultado de la combinación lineal ponderada de las seis capas temáticas realizadas a partir de las seis variables analizadas; y fue reclasificado en cinco clases de susceptibilidad: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta. El mapa final mostró que 16.53% (25.38 Km²) del área de estudio presentaron categorías entre alta y muy alta susceptibilidad; lo cual los hace muy probable a deslizamientos. Además, los resultados mostraron que 17 Km de los 80 Km de la vía Puyo – Tena cuentan con gran probabilidad a deslizamientos, es decir un 22% de la vía. Por último, se determinó que existen quince zonas de mayor probabilidad al deslizamiento por situarse en zonas de alta pendiente, litología porosa y permeable, gran cantidad de ríos y suelos agrícolas. El mapa de susceptibilidad permitirá tomar decisiones para mitigar posibles eventualidades que pongan en riesgos a transportistas, bienes materiales y habitantes del sector.

Palabras Claves

cuenca Anzara, susceptibilidad al deslizamiento, SIG, AHP, variables.

ABSTRACT

The Puyo – Tena road is prone to landslides due to the dynamics, geomorphology and geological materials of the sector. The objective of this work was to generate a landslide susceptibility map focusing exclusively on this road. For the present investigation, six variables were analyzed: slope, geological formations, distances (faults, road and rivers) and finally land use. Each of the variables was ranked and weighted using the analytical hierarchy process to determine their levels of incidence of landslides. The landslide susceptibility map was the result of the weighted linear combination of the six thematic layers made from the six variables analyzed; and was reclassified into five susceptibility classes: very low, low, moderate, high and very high. The final map showed that 16.53% (25.38 Km²) of the study area presented categories between high and very high susceptibility; which makes them very likely to landslide. In addition, the results showed that 17 Km of the 80 Km of the Puyo – Tena road have a high probability of landslide, i.e. 22% of the road. Finally, it was determined that there are fifteen areas with a greater probability of landslides because they are located in areas with steep slopes, porous and permeable lithology, a large number of rivers and agricultural soils. The susceptibility map will allow decisions to be made to mitigate possible eventualities that could put transporters at risk, material goods and sector's inhabitants.

Keywords

Anzara basin, landslide susceptibility, GIS, AHP, variables.

INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de tierra son parte de la dinámica geológica del planeta. Estos deslizamientos tienen movimientos lentos, pero las actividades humanas y procesos como lluvias torrenciales o sobrecargas estáticas, ocasionan que este proceso se acelere y en algunos casos sean catastróficos (Pourghasemi *et al.*, 2018). La susceptibilidad a los deslizamientos indica que tan propensa es una zona en específico a fallar, ya sea a nivel local o regional (Hearn y Hart, 2019). Esta susceptibilidad suele expresarse en forma de mapa. Un mapa de susceptibilidad a deslizamiento muestra la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, sin importar la escala de tiempo.

La cartografía para la susceptibilidad de deslizamientos analiza las principales variables en la inestabilidad del terreno. Estas variables pueden incluir: geología, geomorfología, topografía, distancia a ríos (Raghuvanshi, Ibrahim y Ayalew, 2014; Dahal y Dahal, 2017; Hamza y Raghuvanshi, 2017). La confianza en estos mapas estará estrechamente relacionada a la variedad de variables analizadas y su calidad de datos, escala de trabajo adecuada y el uso de la correcta metodología para el análisis y digitalización de las variables (Daneshvar, 2014). Para el desarrollo de los mapas de susceptibilidad se suele tomar enfoques cualitativos (como el método heurístico y método Mora-Vahrson-Mora) y cuantitativos (como el método determinístico y método estadístico); en algunos casos la unión de ambos. Históricamente, los primeros mapas en desarrollarse constaban de datos cualitativos de los aspectos geológicos y morfológicos de los deslizamientos de laderas inventariadas (Nilsen *et al.*, 1979; Mallick *et al.*, 2018). Progresivamente, los mapas se fueron perfeccionando e incluían análisis más robustos como: proceso de jerarquía analítica, bivariados, multivariados, regresión logística, lógica difusa, redes neuronales

artificiales, entre otros (Carrara, 1983; Van Westen, 1997; Dai *et al.*, 2001; Lee y Min, 2001; Ercanoglu y Gokceoglu, 2004; Lee, Choi y Min, 2004; Komac, 2006).

Los métodos cualitativos se caracterizan por la experiencia y opinión del experto quien conoce el terreno de estudio, inclusive son adecuados para estudios de pequeña y mediana escala. Por lo general, los métodos cualitativos más comunes se limitan a analizar levantamientos de campo de deslizamientos y sus propiedades geológicas y geomorfológicas. Sin embargo, existen métodos cualitativos más sofisticados que evolucionan hasta transformarse en un método semicuantitativo (Nicu y Asăndulesei, 2018). Un método semicuantitativo emplea procedimientos de ponderación y clasificación en métodos cualitativos. Un claro ejemplo, es el proceso de jerarquía analítica, el cual será usado en esta investigación. El proceso de jerarquía analítica o AHP desarrollado por Saaty (1980) desagrega un problema de decisión compleja en diferentes niveles jerárquicos y permite cuantificar las opiniones y transformarlas en un modelo de decisión coherente. El proceso se basa en cuatro principios: desarrollo de la jerarquía, comparación de pares, síntesis de juicios y comprobación de consistencia. En sí, el método otorga una manera más simple y rápida de analizar problemas complejos. Al final, el AHP confiere la mejor opción para la toma de decisiones. El AHP conjuntamente con la combinación lineal ponderada WLC permite tener la representación gráfica de las zonas más susceptibles a deslizamientos.

La región amazónica del Ecuador cuenta con frecuentes deslizamientos de tierra. Por tal razón, es necesario la disponibilidad de información, como mapas, acerca de las zonas más susceptibles a deslizamientos. Por lo general, estos mapas se realizan a escala regional con resoluciones espaciales bajas, siendo difícil al momento de conocer la susceptibilidad de zonas más puntuales (Zumpano *et al.*, 2014). Para el caso de la vía Puyo – Tena, entre las

provincias de Pastaza y Napo, no se cuenta con estudios robustos de la susceptibilidad a deslizamientos (Mindiola y Toulkeridis, 2019). Este tramo vial presenta a menudo constantes deslizamientos que han afectado la vialidad entre ambas provincias, y podría suceder de nuevo en cualquier momento. El presente estudio se enfocó en generar un mapa de susceptibilidad al deslizamiento donde se identificará las zonas más propensas al deslizamiento a lo largo de la vía que une ambas ciudades, tomando en consideración las cuencas hídricas. Se considera a la ruta como una importante red de conexión que une al Ecuador con su Amazonía, a más de ser esencial para el comercio de la región. Un mapa local de susceptibilidad a deslizamientos de tierra permite que entidades locales y gubernamentales puedan tomar a futuro acciones técnicas pertinentes en las zonas más susceptibles al deslizamiento.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La investigación se realizó en el tramo vial Puyo – Tena de las provincias de Pastaza y Napo, en la Amazonía ecuatoriana (Figura 1). La zona de estudio abarca un total de doce cuencas, llamadas conjuntamente de ahora en adelante la cuenca Anzara, como referencia a los dos ríos principales: Anzu y Arajuno. Esta cuenca se encuentra delimitada al oeste por la Cordillera Real, norte por el cantón Tena, este por la cuenca oriente y al sur por el cantón Puyo. La cuenca Anzara ocupa una superficie de 2369.73 Km² y cuenta con zonas montañosas, vertientes, planicies; en sí, una gran variedad de geoformas, además de zonas de acumulación representadas en forma de terrazas aluviales. La zona de estudio tiene una variación altitudinal que oscila entre los 373 m.s.n.m y los 3212 m.s.n.m.

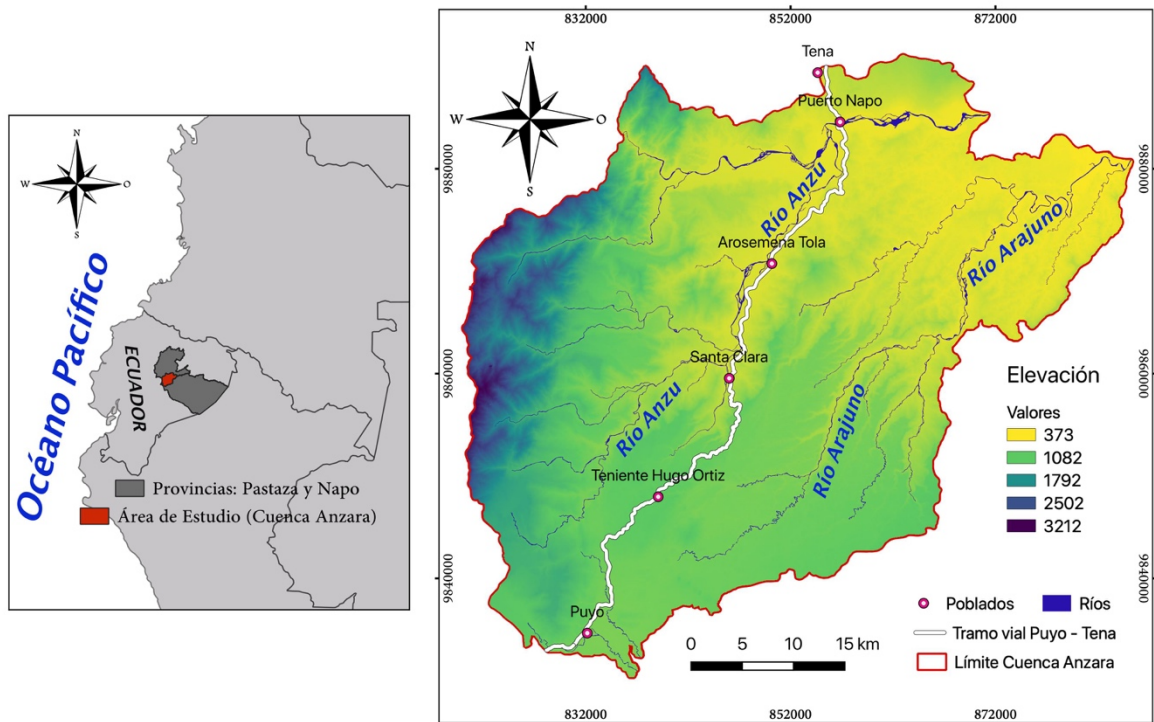


Figura 1. Ubicación del sitio de estudio.

La parte alta de la cuenca Anzara, situada sobre y cerca del intrusivo granito de Abitagua cuenta con una gran variedad de geoformas. Esta región predominantemente está compuesta por zonas montañosas, quebradas, mesetas, barrancos, colinas, chevrones, coluviones, entre otros (MAE, 2014). Al situarse parte de la cuenca en zonas de alta pendiente no existe mucho riesgo a sufrir inundaciones. Asimismo, los diversos procesos geodinámicos del sector han influenciado a la formación y acumulación de fragmentos heterogéneos angulares, conglomerados, depósitos coluvio aluviales y materiales rocosos procedentes de la erosión del granito de Abitagua. En cambio, en la parte más plana de la cuenca existe relieves colinado medio a bajo, valles fluviales, terrazas aluviales; inclusive el paisaje está conformado de rocas volcánicas y sedimentarias de origen más reciente perteneciente a las formaciones Tiyuyacu, Chalcana, Arajuno, Mera, entre otras (MAE, 2014).

La cuenca Anzara al contar con zonas de alta a baja pendiente, altitudes altas a bajas, exposición a elevadas precipitaciones y formación de suelos a partir de las rocas afloradas, constituyen importantes variables para que se formen suelos residuales y transportados, así como deslizamientos y erosión del suelo. La zona de estudio se identifica por tener un clima tropical, caracterizado por ser cálido y húmedo. Su temperatura media es aproximadamente 23.5 °C y su precipitación anual es aproximadamente 4200 mm (Harris *et al.*, 2020). La dinámica de la precipitación mensual más el rango de temperatura conlleva a que haya frecuentes precipitaciones fuertes en la zona de estudio. Por lo tanto, suelos sin cobertura vegetal y con litología porosa estarán expuestos a altos índices de infiltración, ocasionando a futuro posibles deslizamientos de tierra y la erosión del suelo (Laraque *et al.*, 2004; Bravo *et al.*, 2017).

El río Anzu y el río Arajuno (Figura 1), en conjunto con sus afluentes, atraviesan y drenan tanto la parte alta como baja de la cuenca estudiada. Estos ríos cuentan con cursos empinados, semi-empinados, y casi planos en las zonas bajas. Las precipitaciones fuertes, característico en la cuenca, combinadas con montañas empinadas, sus redes de drenaje y terreno poco consolidado, serían factores importantes que intervienen en la inestabilidad de los taludes. Estas variables provocan deslizamientos, erosión del suelo y hasta lixiviación del mismo (Barakat *et al.*, 2017, 2018).

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación empezó con la recopilación de información geológica del área de estudio, información acerca de los deslizamientos suscitados en el sitio, elaboración de un mapa para el inventario de deslizamientos; inclusive, interpretación de fotografías aéreas.

Para el análisis de susceptibilidad a deslizamientos de este estudio, se recorrió el tramo vial Puyo – Tena con ayuda de mapas topográficos y se inventarió los deslizamientos encontrados. Posteriormente, los deslizamientos localizados se georreferenciaron y se analizaron mediante observaciones y caracterizaciones geomecánicas in-situ. Esto permitió determinar las variables y sub-variables que han intervenido en los deslizamientos; y sucesivamente su ponderación. Estos pasos se complementaron con recopilación bibliográfica. Las sub-variables se refieren a las distintas divisiones que tiene cada variable; por ejemplo, las formaciones: Tena, Mera y Arajuno, son sub-variables de la variable formaciones geológicas. Se estableció que seis variables intervienen en la inestabilidad del terreno. Estas variables fueron: formaciones geológicas, pendiente, fallas geológicas, carretera, redes de drenaje y cobertura y uso del terreno CUT. Posteriormente, se desarrollaron las seis capas temáticas correspondientes a las seis variables. Estas capas temáticas se recortaron teniendo como capa máscara al buffer de máximo valor de las variables, el cual fue 1000 m (buffer de distancia a fallas). Este recorte se hizo para analizar específicamente la vía Puyo – Tena. Luego las capas temáticas se combinaron utilizando los pesos de las variables y sub-variables calculados con el AHP, para finalmente obtener el mapa de susceptibilidad a deslizamientos. La unión de todas las capas temáticas se realizó con el proceso de combinación lineal ponderada WLC, el cual es un servicio que ofrece los programas de sistemas de información geográfica SIG. El mapa de susceptibilidad se categorizó en cinco clases de susceptibilidad: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta. Esta categorización se basó a partir de cinco divisiones del número total de píxeles del mapa raster final.

PREPARACIÓN DE LAS CAPAS DE LAS VARIABLES DE DESLIZAMIENTO

Toda la información y datos utilizados para cumplir con el objetivo se recopilaron de distintas fuentes (Tabla 1). Para cada una de las capas temáticas se evaluó su grado de incidencia para la susceptibilidad a deslizamientos de tierra.

Tabla 1. Fuentes de datos usados para el estudio.

Datos	Descripción	Fuente
Ortofotografías (Resolución 0.30 m)	Descargado	PROGRAMA SIGTIERRAS http://www.sigtierras.gob.ec/
Modelo Digital de Elevación DEM (Resolución 12.5 m)	Descargado	MAGAP http://geoportal.agricultura.gob.ec/
Pendiente	Derivado del DEM 12.5 m	DEM 12.5 m
Formaciones Geológicas	Descargado	MAGAP http://geoportal.agricultura.gob.ec/
Fallas Geológicas	Descargado	PROYECTO SARA https://sara.openquake.org/start
Carretera	Descargado	IGM http://www.geoportalignm.gob.ec/portal/
Red de Drenaje	Descargado	IGM http://www.geoportalignm.gob.ec/portal/
Cobertura y uso del Terreno (CUT)	Descargado	MAGAP http://geoportal.agricultura.gob.ec/
*Cuencas Hidrográficas	Descargado	SUIA MAA Unidad http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/ Geográfica Nivel 7

*Las 12 cuencas hidrográficas se unieron en un solo polígono. Este polígono sirvió como máscara para recortar las demás capas vectoriales y raster.

Finalizado la etapa de inventario y análisis de deslizamientos, de observaciones hechas en las salidas de campo, se generaron las capas temáticas que intervienen en la susceptibilidad a deslizamientos. Estas capas temáticas incluyen valores de: formaciones geológicas, rangos de pendiente, distancias a zonas de falla, distancia a la carretera, distancias a las

principales redes de drenaje, y por último, el tipo de uso que se da al terreno. Todas las ponderaciones hechas para las seis variables y sus sub-variables fueron seleccionadas acorde a los análisis efectuados en campo y oficina. Las distintas reclasificaciones para cada capa temática se realizaron con base en la disponibilidad de datos de cada variable, permitiendo así un óptimo tratamiento de las mismas. Posteriormente, se combinaron las capas temáticas analizadas con el AHP mediante el WLC, el cual es una herramienta SIG que permite procesar las capas raster. Las capas temáticas de distancia de: fallas geológicas, carretera y redes de drenaje se calcularon mediante la herramienta buffer en QGIS. La pendiente se obtuvo a partir de un Modelo Digital de Elevación DEM de 12.5 m de píxel de la zona de estudio. Tanto el DEM, como el resto de variables, incluido las formaciones geológicas y CUT, fueron trabajadas en el software libre QGIS versión 3.4 Madeira (Figura 2).

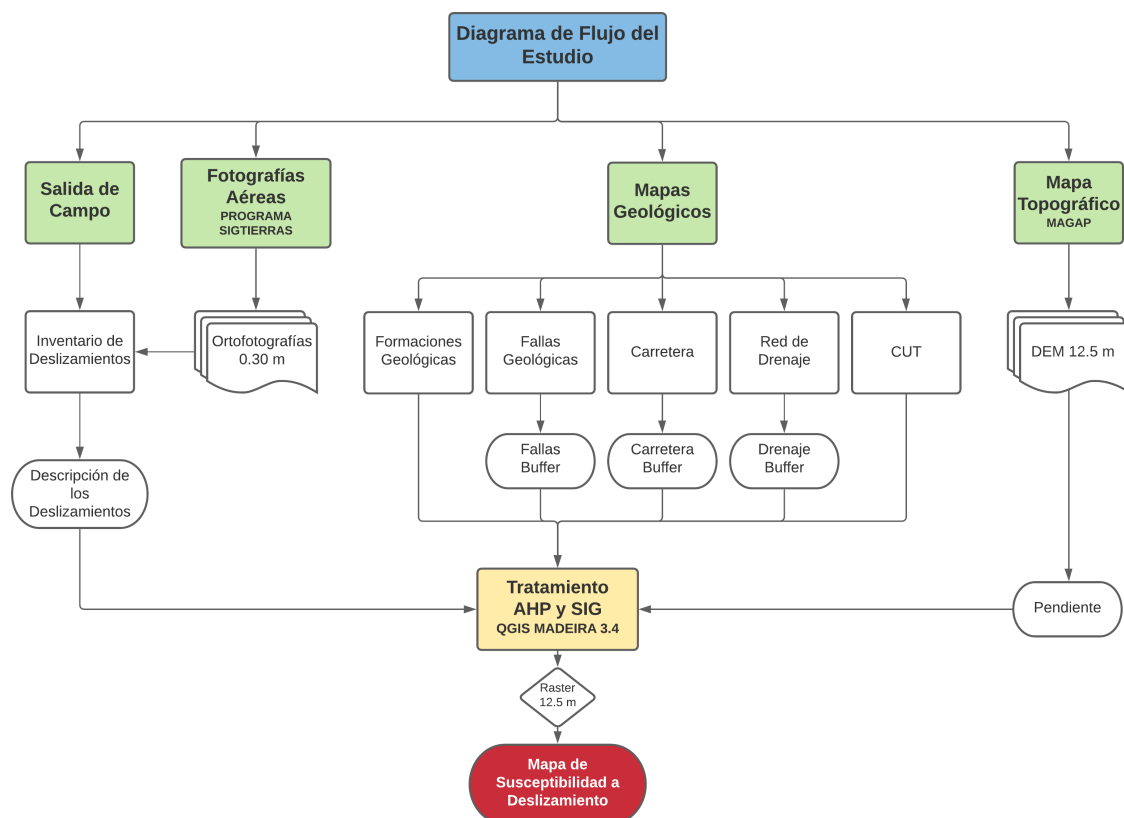


Figura 2. Diagrama de Flujo del Estudio.

Todas las capas temáticas vectoriales se rasterizaron con resolución de píxel de 12.5 m x 12.5 m. La rasterización permitió que las seis capas temáticas pudieran ser combinadas y formar una sola capa raster. La resolución en 12.5 m se seleccionó debido a que esa fue la resolución espacial con que se trabajó el DEM. El procedimiento de cada una de las variables se detalla a continuación.

PENDIENTE

Los valores de pendiente se extrajeron del DEM de 12.5 m. La pendiente es una variable indispensable para determinar la estabilidad de taludes (Dolui y Muthulakshmi, 2019). En este estudio, la capa temática de pendiente se obtuvo a partir del algoritmo *gdaldem*; y se reclasificó en seis clases: $< 5^\circ$, $5 - 12^\circ$, $12 - 25^\circ$, $25 - 40^\circ$, $40 - 70^\circ$ y $> 70^\circ$. (Figura 3a y 4a). Cada clasificación se seleccionó de acuerdo a su probabilidad de incidencia a deslizamientos, no es lo mismo que haya un talud semi horizontal a uno vertical. La ponderación de cada sub-variable de la variable pendiente se describe en la Tabla 4.

FORMACIONES GEOLÓGICAS

Las formaciones geológicas son usadas en estudios de susceptibilidad a deslizamientos debido a que su litología puede influenciar en la inestabilidad de los taludes (Althuwaynee y Pradhan, 2017). Se registraron un total de siete formaciones, depósitos aluviales, depósitos coluviales y otros (sin descripción) a lo largo de la vía de interés. Cada formación es única, cada estratificación y disponibilidad litológica favorecerá a que haya mayor o menor probabilidad de deslizamiento. Por consiguiente, se realizó la capa temática de formaciones con una reclasificación de diez clases (Figura 3b y 4b). La ponderación de cada sub-variable de la variable formaciones geológicas se describe en la Tabla 4.

DISTANCIA A LAS FALLAS

Las zonas con fallas activas son susceptibles a deslizamientos (Demir *et al.*, 2013). Las áreas más cercanas a esta zona tienen mayor probabilidad de ocurrencia a deslizamientos, debido al intenso cizallamiento. Para el desarrollo de la capa temática de fallas, estas se reclasificaron en cinco clases de distancias: < 200 m, 200 – 400 m, 400 – 600 m, 600 – 1000 m y > 1000 m (Figura 3c y 4c). Las distancias en la reclasificación se basaron a partir de la observación de afloramientos afectados por las zonas de falla. Las fallas presentes en el área de estudio corresponden a fallas cuaternarias $\sim < 1.8$ Ma. La ponderación de cada sub-variable de la variable distancia a las fallas se describe en la Tabla 4.

DISTANCIA A LA CARRETERA

Las carreteras situadas en zonas de taludes crean condiciones de susceptibilidad, sobre todo las que son pavimentadas. Por lo general, este tipo de carreteras aumentan la susceptibilidad a deslizamientos debido a la presencia de infraestructuras, proceso de colonización y aparición de nuevos asentamientos (Igwe *et al.*, 2020). De acuerdo a estos parámetros, esta capa temática se reclasificó en cuatro clases de distancias a la carretera: < 250 m, 250 – 500 m, 500 – 750 m y > 750 m (Figura 3d y 4d). La ponderación de cada sub-variables de la variable distancia a la carretera se describe en la Tabla 4.

DISTANCIA AL DRENAJE

La dinámica de los ríos crea condiciones que favorecen los deslizamientos de suelo (Achour *et al.*, 2017). Las redes de drenaje que se sitúan en zonas de alta pendiente

erosionan el terreno y favorecen a la formación de deslizamientos (Bui *et al.*, 2011). Para esta capa temática, la red de drenaje se reclasificó en cinco clases: < 50 m, 50 – 250 m, 250 – 500 m, 500 – 750 m y > 750 m (Figura 3e y 4e). Esta clasificación se basó de acuerdo al grado de influencia que ha tenido la red de drenaje con el terreno. En síntesis, mientras más cerca se encuentre el terreno al río mayor será la probabilidad de deslizamientos. La ponderación de cada sub-variables de la variable distancia al drenaje se describe en la Tabla 4.

COBERTURA Y SUELO DEL TERRENO (CUT)

El cambio del uso del terreno es una variable importante que favorece la susceptibilidad a deslizamientos. Por ejemplo, la remoción de bosque para convertirlo en pastizales, zonas agrícolas o zonas de expansión urbana, intensifica la erosión y flujo de caudales cuando llueve. Esto provocará pérdida en la compactación del suelo. Esta descompactación en zonas de alta pendiente ocasionará que el suelo sea más susceptible a desprenderse. Estos acontecimientos favorecen en gran medida a la susceptibilidad del deslizamiento del terreno (Guevara, Carbajal y Vargas, 2020). Para el desarrollo de esta última capa temática, la CUT se reclasificó en cinco clases (Figura 3f y 4f). Cada clase tuvo una ponderación distinta, ya que cada tipo de uso de suelo favorecerá de distinta manera la susceptibilidad al deslizamiento. La ponderación de cada sub-variables de la variable CUT se describe en la Tabla 4.

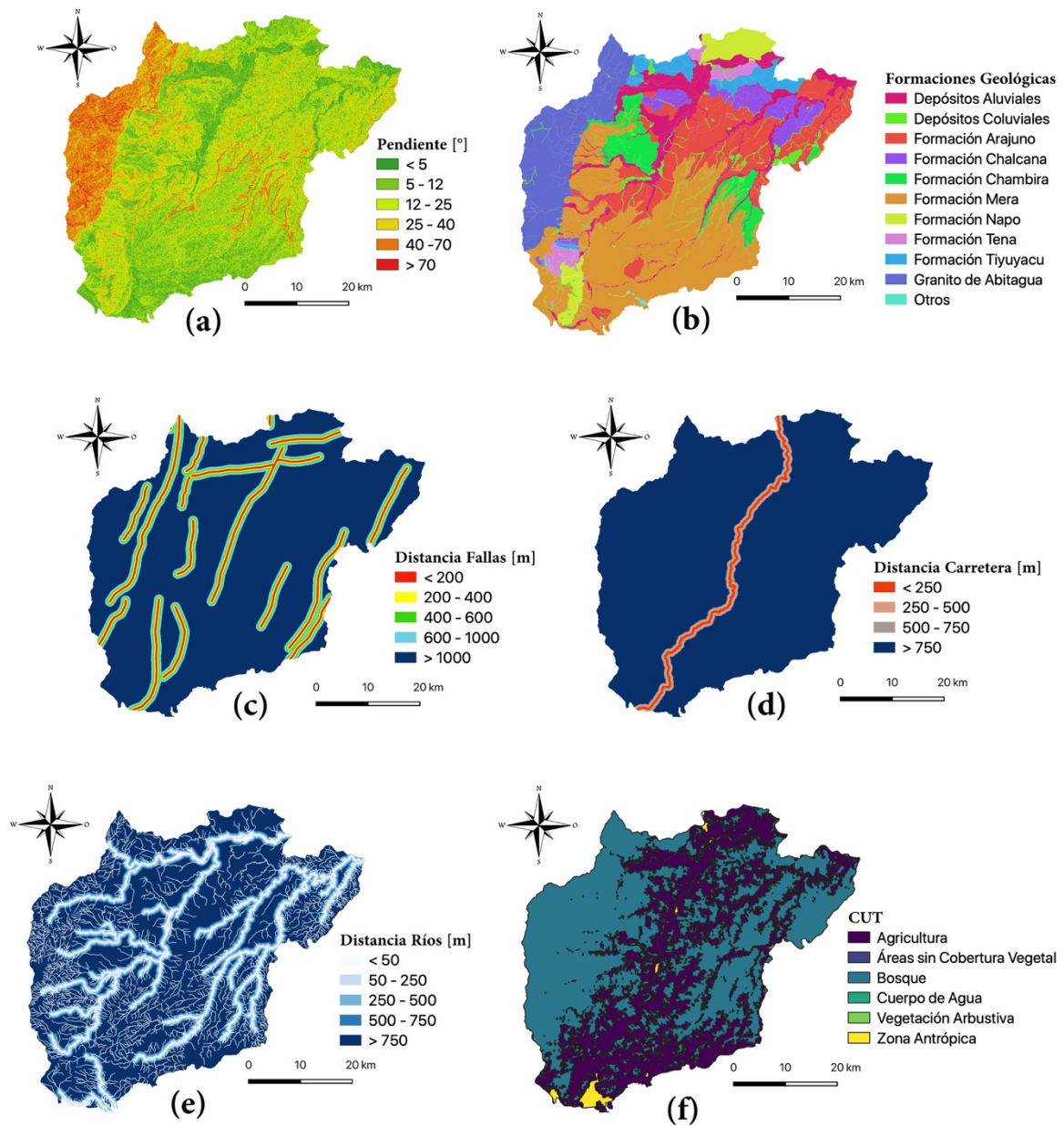


Figura3. Distribución de las variables en la cuenca Anzara: (a) Pendiente, (b) Formaciones Geológicas, (c) Distancia a Fallas, (d) Distancia a la Carretera, (e) Distancia a Ríos y (f) Cobertura y Uso del Terreno CUT.

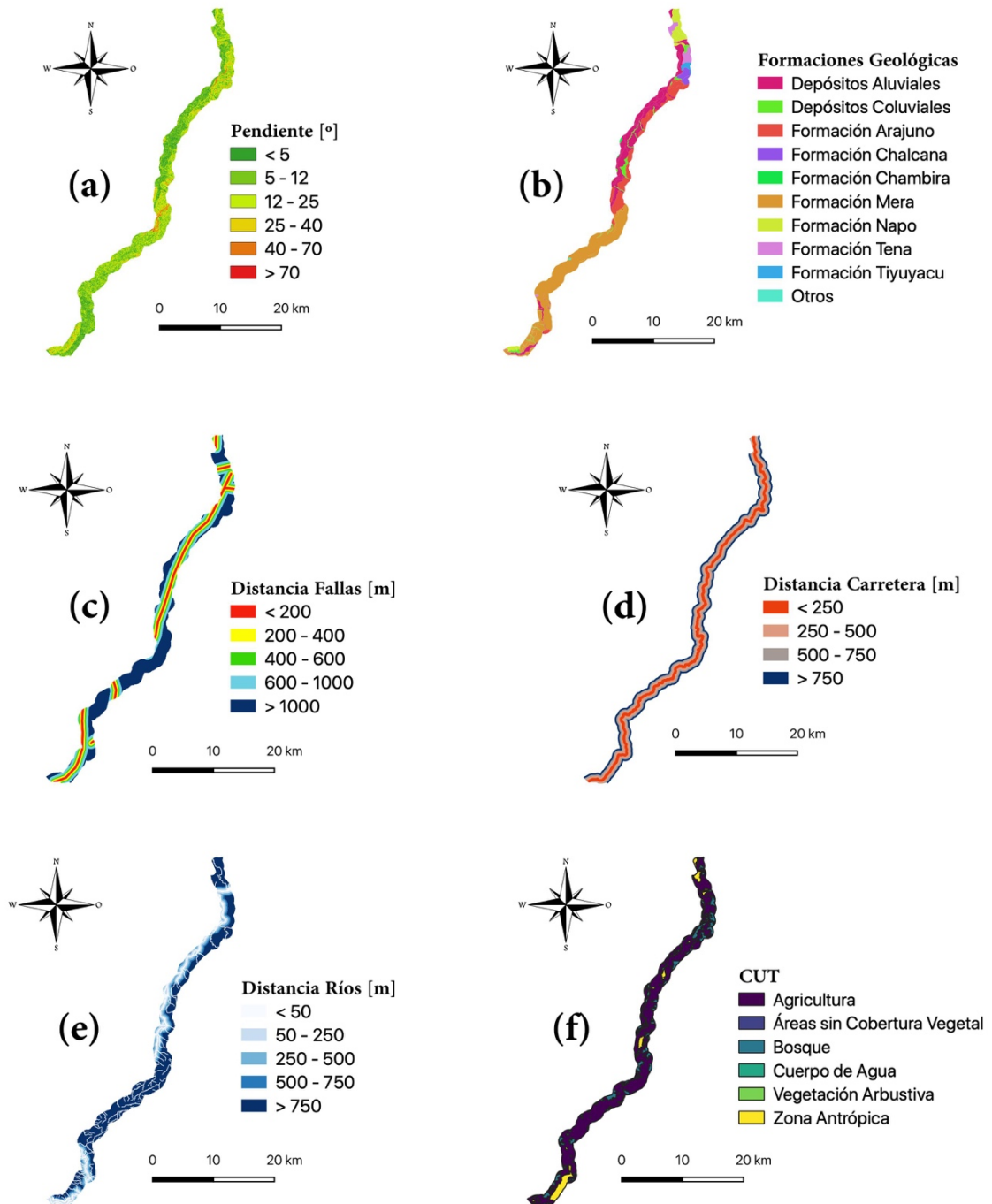


Figura4. Capas temáticas de las variables a lo largo de la vía Puyo – Tena: (a) Pendiente, (b) Formaciones Geológicas, (c) Distancia a Fallas, (d) Distancia a la Carretera, (e) Distancia a Ríos y (f) Cobertura y Uso del Terreno CUT.

CARTOGRAFÍA DE SUSCEPTIBILIDAD

Se empleó el método AHP para calcular el peso relativo de cada una de las seis variables analizadas a lo largo de la vía Puyo - Tena. Los pasos utilizados se describen a continuación:

1. Desarrollo de la estructura jerárquica. En este punto se identificó las variables y las sub-variables analizadas.
2. Matriz de juicios por comparación de pares. Ponderación relativa de acuerdo a la tabla (Saaty, 1980) (Tabla 2). Se estableció la prioridad y se ponderó a las ocho variables y sus sub-variables. Utilizando el criterio de la tabla de Saaty se decidió que variable es más importante en relación a otra variable; el mismo criterio se aplicó para las sub-variables.
3. Síntesis de juicios comparativos. Cálculo de la prioridad final de cada variable y sub-variable de acuerdo a la tabla (Saaty, 1980). En este apartado se obtuvo la ponderación final de cada variable y sub-variable, así se calculó cuánto aportaron las variables para cumplir con el objetivo.
4. Evaluación de Consistencia. Permitted verificar si las ponderaciones de los juicios comparativos tuvieron lógica.
5. Combinación de mapas temáticos y obtención de mapa de susceptibilidad.
6. Reclasificación del mapa de susceptibilidad final.

Tabla 2. Escala fundamental de Saaty (1980).

Valor	Definición	Explicación
1	Igual de importancia	Dos elementos de decisión influyen por igual en el elemento de decisión principal.
3	Moderadamente más importante	Un elemento de decisión es moderadamente más influyente que otro.
5	Mucho más importante	Un elemento de decisión tiene más influencia que otro.
7	Muchísimo más importante	Un elemento de decisión tiene una influencia significativamente mayor que el otro.
9	Extremadamente más importante	La diferencia de decisión entre las influencias de los dos elementos de decisión es extremadamente significativa.
2, 4, 6, 8	Valores de juicios intermedios	Valores de juicio entre igual, moderadamente, mucho y extremadamente

Una vez realizada las ponderaciones, empleando el cálculo de coherencia o radio de coherencia (CR), se determinó si el cálculo concluyó correctamente o no, descrita en la Ec (1). Así fue posible reconocer si hubo coherencia o no en la comparación de rango de importancia de cada variable y sub-variable.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

Donde, RI (Tabla 3) se refiere al índice de consistencia aleatorio; en cambio, CI se refiere al índice de consistencia, descrita en la Ec (2). El RI es un valor definido que es parte del método AHP.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

Tabla 3. Índice de Consistencia Aleatorio de Saaty (1980).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Donde, λ_{max} es el valor máximo propio y se calcula a partir de la matriz y n es el orden de la matriz. Según Saaty (1980), la relación de coherencia debe ser menor o igual al 10 % o una imprecisión inferior al 10%. El principio consiste en comparar el juicio con la comparación aleatoria de los elementos. Finalmente, las ponderaciones integraron las distintas clases causales en un único índice de susceptibilidad a los deslizamientos, LSI , utilizando la Ec (3) (Saaty, 1980).

$$LSI = \sum_{i=1}^n R_i * W_i \quad (3)$$

Donde, R_i son las clases de clasificación de cada variable y W_i son las ponderaciones para cada una de las variables condicionantes de los deslizamientos. El mapa LSI resultante se reclasificó en cinco clases (muy baja, baja, moderada, alta y muy alta). La reclasificación se basó en cinco divisiones de los valores de los píxeles del mapa final de susceptibilidad al deslizamiento.

RESULTADOS

El desarrollo de la jerarquización y comparación de pares permitió conocer las principales variables y sub-variables que intervinieron en los procesos de deslizamientos de suelo (Tabla 4). El análisis de índice de consistencia para cada variable y para el mapa de susceptibilidad final obtuvieron un valor inferior a 0.10 (Tabla 4). Tras el desarrollo de la jerarquización, comparación de pares, juicios comparativos y evaluación de la consistencia se obtuvo la matriz final con las ponderaciones de las seis variables para la realización del mapa final de susceptibilidad al deslizamiento (Tabla 5). El mapa final de susceptibilidad a deslizamientos se reclasificó en cinco clases: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta (Figura 5). Con base en los resultados de la (Tabla 6), el porcentaje del área

de susceptibilidad muy baja, baja, moderada, alta y muy alta es 0.64%, 31.96%, 50.87%, 15.83% y 0.70%, respectivamente. Una vez culminado el mapa, se encontró que en la vía Puyo – Tena existen quince tramos con clases de susceptibilidad alta y muy alta (Tabla 7 y Figura 5). Estas zonas fueron seleccionadas tras la observación y análisis del mapa final. Los deslizamientos inventariados se colocaron sobre el mapa y gran parte de ellos se situaron dentro de estos quince tramos de alta y muy alta susceptibilidad al deslizamiento.

Tabla 4. Matriz de jerarquización y comparación de pares de las variables y sub-variables.

Variables	Sub-variables	Ponderación Sub-variables	Ponderación Variables	Pesos Sub-VARIABLES	CR Variables
Formaciones Geológicas	Depósito Aluvial	2	7	0.04	0.00182
	Formación Tena	8		0.15	
	Formación Mera	7		0.13	
	Formación Arajuno	8		0.15	
	Formación Chambira	6		0.12	
	Formación Napo	5		0.10	
	Formación Tiyuyacu	6		0.12	
	Formación Chalcana	5		0.10	
	Depósito Coluvial	4		0.08	
	Otros	1		0.02	
Fallas	< 200	9	2	0.36	0.00163
	200 – 400	7		0.28	
	400 – 600	5		0.20	
	600 – 1000	3		0.12	
	> 1000	1		0.04	
Pendiente	< 5°	1	9	0.04	0.00201
	5 – 12°	2		0.08	
	12 – 25°	4		0.15	
	25 – 40°	5		0.19	
	40 – 70 °	8		0.31	
	> 70°	6		0.23	
Distancia a Carretera	< 250	7	3	0.41	0.00300
	250 – 500	5		0.29	
	500 – 750	3		0.18	
	> 750	2		0.12	
Distancia al Drenaje	< 50	9	6	0.37	0.00208
	50 – 250	7		0.29	
	250 – 500	4		0.17	
	500 – 750	3		0.13	
	> 750	1		0.04	
	Agricultura	7		5	

Cobertura y Uso de la tierra	Área sin Cobertura	1	0.05
	Vegetal		
	Bosque	4	0.21
	Vegetación Arbustiva	5	0.26
	Zona Antrópica	2	0.11
Mapa temático Final (combinación de las ocho variables)			

Tabla 5. Matriz de comparación de pares y ponderación final de cada variable causante de deslizamiento de tierra.

	Matriz de Comparación de Pares.						Ponderación	CR Final
	Pendiente	Formaciones Geológicas	Drenaje	CUT	Carretera	Fallas		
Pendiente	1.00						0.28	
Formaciones Geológicas	0.78	1.00					0.22	0.00328
Drenaje	0.67	0.86	1.00				0.19	
CUT	0.56	0.72	0.84	1.00			0.16	
Carretera	0.34	0.43	0.50	0.60	1.00		0.09	
Fallas	0.23	0.29	0.34	0.40	0.67	1.00	0.06	

Tabla 6. Áreas de las categorías del mapa de susceptibilidad a deslizamientos.

Categorías de Susceptibilidad	Área [Km ²]	Área [%]
Muy Baja	0.97	0.64
Baja	49.07	31.96
Moderada	78.10	50.87
Alta	24.31	15.83
Muy Alta	1.07	0.70
Total	153.52	100%

Tabla 7. Principales tramos de la carretera Puyo – Tena con susceptibilidad alta y muy alta a deslizamientos.

Región	Km [Inicio]	Coordenadas Grado-Decimal		Km [Fin]	Coordenadas Grado-Decimal	
		Longitud	Latitud		Longitud	Latitud
1	0.125	-78.0500	-1.5088	3.692	-78.0236	-1.4993
2	14.163	-77.9987	-1.4235	14.275	-77.9988	-1.4225
3	29.018	-77.9238	-1.3486	29.329	-77.9224	-1.3465
4	36.498	-77.8880	-1.3119	36.765	-77.8858	-1.3111
5	38.933	-77.8822	-1.2963	39.679	-77.8840	-1.2914
6	41.097	-77.8897	-1.2853	42.424	-77.8898	-1.2746
7	44.583	-77.8886	-1.2569	48.331	-77.8821	-1.2304
8	56.780	-77.8547	-1.1634	57.653	-77.8511	-1.1568
9	59.150	-77.8425	-1.1470	60.820	-77.8328	-1.1361
10	63.517	-77.8169	-1.1197	63.938	-77.8137	-1.1217
11	66.121	-77.8053	-1.1076	66.700	-77.8018	-1.1042
12	67.864	-77.7920	-1.1051	68.886	-77.7947	-1.0973
13	70.238	-77.7901	-1.0871	70.937	-77.7916	-1.0812
14	72.836	-77.7904	-1.0657	73.655	-77.7912	-1.0597
15	75.536	-77.7966	-1.0459	76.381	-77.7951	-1.0391

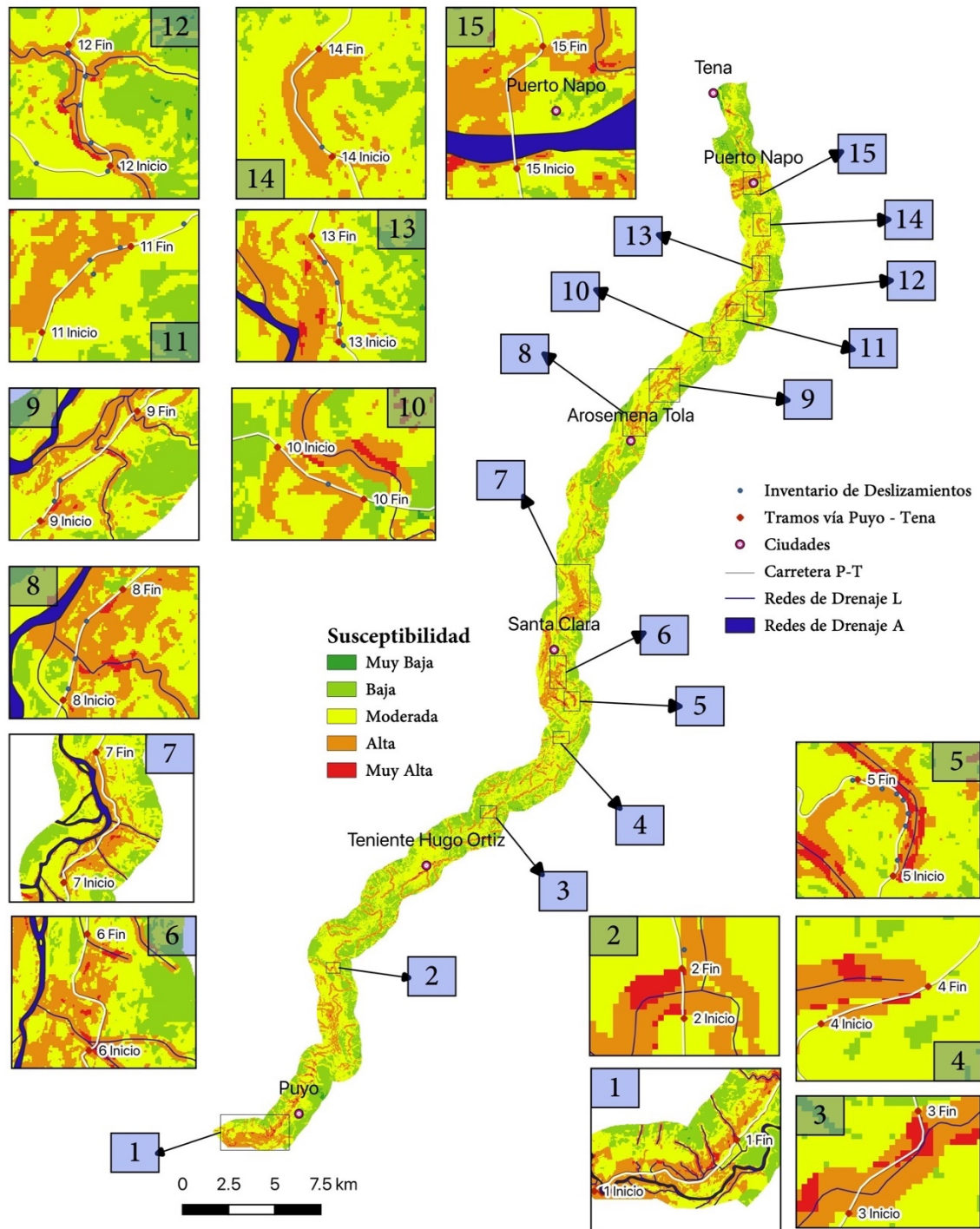


Figura 5. Mapa LSI de Susceptibilidad al Deslizamiento usando el método AHP. Tramos de la vía Puyo – Tena.

DISCUSIÓN

Los datos presentados de las seis variables muestran cómo influyen en la susceptibilidad a deslizamientos a lo largo de la vía Puyo – Tena. A raíz de la jerarquización, ponderación de pares, juicios comparativos y el valor obtenido en la evaluación de consistencia ($CR < 0.1$), nos da a conocer que todas las ponderaciones, tanto en variables y sub-variables, son confiables y que fueron realizadas correctamente. Teniendo como base la cuenca Anzara para el análisis (Figura 3), esta se recortó y se mantuvo específicamente la zona entre la vía Puyo – Tena (Figura 4) para así cumplir con el objetivo de la investigación. Acorde al mapa final LSI de susceptibilidad al deslizamiento (Figura 5), del total del área analizada, solo un 16.53% (25.38 Km²) corresponden a regiones potenciales para deslizamientos de tierra, repartido 15.83% en alta y 0.70% en muy alta susceptibilidad. El resto, aproximadamente 83.57% (128.14 Km²) de la vía de estudio, no representa gran riesgo para una posible eventualidad a deslizamientos. Además, conforme a los datos que muestra la Tabla 7, aproximadamente 17 Km de los aproximados 80 Km que son de la vía Puyo – Tena son susceptibles a deslizamientos, es decir, ~ 22% de la vía tiene peligro a deslizamientos de tierra.

Una vez analizado las variables in-situ y digitalmente, se determina que las cuatro variables más importantes a intervenir en procesos de deslizamientos son: pendiente, formaciones geológicas, redes de drenaje y CUT; en cambio, las dos variables restantes: distancia a carretera y distancia a fallas, son las que tienen menos influencia. Para esta investigación las variables analizadas tienen esta jerarquía, pero como mencionan He y Beighley (2009), quizás en otras condiciones y otra zona de estudio, las variables menos influyentes, de este caso, pueden ser las más importantes. Por ejemplo, si una carretera en construcción está atravesando solo montañas empinadas, o si la zona de estudio está cerca de zonas de fallas

regionales convergentes y muy activas, serían las principales variables para la susceptibilidad a deslizamientos.

Con base en los resultados, se determina que existen quince tramos de la vía con gran probabilidad de deslizamientos (Figura 5 y Tabla 7). La mayoría de los tramos se localizan fuera de los principales poblados, a excepción de los tramos 1, 7 y 15, los cuales se encuentran cerca de Puyo, Santa Clara y Puerto Napo, respectivamente. A pesar de su cercanía no presenta un riesgo latente a los habitantes de estos sectores. Las características de las seis variables que determinaron que haya quince tramos entre alta y muy alta susceptibilidad a los deslizamientos, se detallan a continuación. Para este estudio, la pendiente es la variable más importante debido a que la mayoría de los deslizamientos inventariados muestran rasgos de ser influenciados por la inclinación del afloramiento y no tanto por la litología. La mayoría de deslizamientos se encuentran en zonas con pendientes $> 40^\circ$; específicamente en el rango de $40 - 70^\circ$. Las formaciones geológicas se consideran la segunda variable de incidencia importante, ya que su constitución litológica, resistencia geomecánica y porosidad intervienen en la susceptibilidad a los deslizamientos. Las condiciones físicas de cada formación geológica influyen de distinta manera para la aparición de deslizamientos. Formaciones geológicas, como: Chambira, Tiyuyacu, Mera, Tena y Arajuno, cuentan con litología porosa, baja resistencia geomecánica y con poca resistencia a la permeabilidad; por tal razón, cuentan con gran número de deslizamientos. Por estas características, esta variable es una de las principales. Las redes de drenajes son la tercera variable en importancia a deslizamientos. Los distintos ríos atraviesan diversas zonas de alta pendiente, favoreciendo así la erosión del terreno, descompactación y pérdida en la resistencia del suelo. La mayoría de deslizamientos se encuentran cerca de los ríos pequeños y grandes, lo que da una clara idea que es una variable importante en

procesos de deslizamientos. Por último, la CUT también se considera una variable importante. El cambio del uso de suelo provoca que el terreno se degrade, pierda resistencia mecánica, sea más porosa y ocasione mayor infiltración de agua y por tanto sea más susceptible a deslizamientos. Todos estos aspectos son influenciados por actividades antrópicas, las cuales se observan claramente a lo largo de la vía Puyo – Tena. En cambio, la distancia a la carretera y la distancia a fallas son las que menos influyen en los deslizamientos del terreno. La carretera Puyo – Tena, al ser asfaltada, tiene gran ocurrencia de tránsito, pero los movimientos suscitados por vehículos o actividades humanas, no influyen en gran proporción para que se de deslizamientos. Las fallas geológicas, por su dinámica, crean sismos y con eso mueven la superficie de la Tierra. Los sismos en la Amazonía, en cantidad, han sido menores en comparación a otras regiones del país y sus daños han sido leves (Rivadeneira *et al.*, 2007). Hasta la actualidad, en la vía de estudio estos sismos son de magnitud baja con poca periodicidad y no tiene gran repercusión para deslizamientos. Por estos motivos, estas dos variables son las que menos influyen para la ocurrencia de deslizamientos en la zona de estudio.

Por último, en décadas recientes se han desarrollado nuevos métodos cartográficos para el análisis de la susceptibilidad. Este método, AHP, se basa a partir de inventarios de deslizamientos y análisis estadísticos, multicriterio, criterio del experto, jerarquización, entre otros. En esta investigación se ha utilizado el enfoque AHP con SIG para lograr desagregar un problema de decisión compleja en un modelo de decisión más simple y coherente. Se tomaron en cuenta seis variables que están presentes en procesos de deslizamientos de suelo. La jerarquización de cada una de ellas estuvo sujeta al inventario de deslizamientos y al conocimiento del área de estudio. A partir de los cuatro principios del método AHP se logró obtener un mapa LSI de susceptibilidad al deslizamiento, y así

determinar las principales zonas más susceptibles al deslizamiento de tierra de la vía Puyo – Tena.

CONCLUSIÓN

La susceptibilidad a los deslizamientos en la vía Puyo – Tena se evaluó mediante el método AHP, que permitió una rápida y práctica manipulación de los datos físicos de la zona de estudio. El mapa LSI de susceptibilidad se pudo obtener mediante la jerarquización, ponderación y digitalización de las seis variables que intervinieron en la investigación. De primera mano, el mapa LSI de susceptibilidad al deslizamiento se reclasificó en cinco clases de susceptibilidad obteniendo superficies de 0.64%, 31.96%, 50.87%, 15.83% y 0,70% para las clases de muy baja, baja, moderada, alta y muy alta, respectivamente. Se determinó que aproximadamente 17 Km de los aproximados 80 Km que son de la vía Puyo – Tena son susceptibles a deslizamientos, es decir, ~ 22% de la vía tiene peligro a deslizamientos de tierra. Se concluyó que la vía estudiada cuenta con quince tramos entre alta y muy alta probabilidad para la aparición de deslizamientos. Estos tramos se situaron sobre zonas de alta pendiente, litología porosa y permeable, gran cantidad de ríos y suelos aptos para la agricultura. Por tal motivo, las variables: pendiente, formaciones geológicas, redes de drenaje y CUT fueron las más importantes para obtener estos resultados. El mapa de susceptibilidad a deslizamientos proporciona información coincidente con el inventario de deslizamientos levantado en campo sobre posibles deslizamientos futuros en el área. Este mapa puede ser manejado por instituciones gubernamentales o no gubernamentales que tienen como fin la planificación del uso del suelo, planificación y gestión del territorio o fines similares. El mapa de susceptibilidad permitirá: tomar decisiones para evitar posibles peligros que atenten contra la vida y bienestar de la población, planificar una eficiente red

vial, considerar las mejores opciones para la expansión urbana y rural, inclusive, desarrollar políticas de construcción aledañas a las vías.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación cuenta con el apoyo del Mgs. Jorge Ronny Espín Campos y PhD Bryan Guido Valencia Castillo, quienes con sus consejos, aportes y sus valiosos comentarios sobre el manuscrito permitieron que esta investigación se de.

REFERENCIAS

- Achour, Y. *et al.* (2017) «Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria», *Arabian Journal of Geosciences*. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(8). doi: 10.1007/s12517-017-2980-6.
- Althuwaynee, O. F. y Pradhan, B. (2017) «Semi-quantitative landslide risk assessment using GIS-based exposure analysis in Kuala Lumpur City», *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. Taylor & Francis, 8(2), pp. 706-732. doi: 10.1080/19475705.2016.1255670.
- Baby, P., Rivadeneira, M. y Barragán, R. (2004) *La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo*.
- Barakat, A. *et al.* (2017) «Multivariate analysis and GIS-based soil suitability diagnosis for sustainable intensive agriculture in Beni-Moussa irrigated subperimeter (Tadla plain, Morocco)», *Modeling Earth Systems and Environment*. Springer International Publishing, 3(1), p. 8. doi: 10.1007/s40808-017-0272-5.
- Barakat, A. *et al.* (2018) «Physicochemical and microbial assessment of spring water quality for drinking supply in Piedmont of Béni-Mellal Atlas (Morocco)», *Physics and Chemistry of the Earth*. Elsevier Ltd, 104, p. 22. doi: 10.1016/j.pce.2018.01.006.

- Bravo, C. *et al.* (2017) «Indicadores morfológicos y estructurales de calidad y potencial de erosión del suelo bajo diferentes usos de la tierra en la Amazonía ecuatoriana», *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 37(2), pp. 247-264. doi: 10.5209/AGUC.57725.
- Bui, D. T. *et al.* (2011) «Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression», *Natural Hazards*, 59(3), pp. 1413-1444. doi: 10.1007/s11069-011-9844-2.
- Carrara, A. (1983) «Multivariate models for landslide hazard evaluation», *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 15(3), pp. 403-426. doi: 10.1007/BF01031290.
- Dahal, B. K. y Dahal, R. K. (2017) «Landslide hazard map: tool for optimization of low-cost mitigation», *Geoenvironmental Disasters*. *Geoenvironmental Disasters*, 4(1). doi: 10.1186/s40677-017-0071-3.
- Dai, F. C. *et al.* (2001) «Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong», *Environmental Geology*, 40(3), pp. 381-391. doi: 10.1007/s002540000163.
- Daneshvar, M. R. M. (2014) «Landslide susceptibility zonation using analytical hierarchy process and GIS for the Bojnurd region, northeast of Iran», *Landslides*, 11(6), pp. 1079-1091. doi: 10.1007/s10346-013-0458-5.
- Demir, G. *et al.* (2013) «A comparison of landslide susceptibility mapping of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone (Turkey) by likelihood-frequency ratio and analytic hierarchy process methods», *Natural Hazards*, 65(3), pp. 1481-1506. doi: 10.1007/s11069-012-0418-8.
- Dolui, B. y Muthulakshmi, Y. R. (2019) «Thematics Journal of Geography Landslide

- Susceptibility Mapping Using AHP Model in Nilgiri District», *Thematics Journal of Geography*, 8(12), pp. 189-208.
- Ercanoglu, M. y Gokceoglu, C. (2004) «Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey)», *Engineering Geology*, 75(3-4), pp. 229-250. doi: 10.1016/j.enggeo.2004.06.001.
- Guevara, M. de J., Carbajal, N. y Vargas, J. T. (2020) «Soil deterioration in the southern Chihuahuan Desert caused by agricultural practices and meteorological events», *Journal of Arid Environments*. Elsevier, 176(December 2018), p. 104097. doi: 10.1016/j.jaridenv.2019.104097.
- Hamza, T. y Raghuvanshi, T. K. (2017) «GIS based landslide hazard evaluation and zonation – A case from Jeldu District, Central Ethiopia, GIS based landslide hazard evaluation and zonation», *Journal of King Saud University - Science*. King Saud University, 29(2), pp. 151-165. doi: 10.1016/j.jksus.2016.05.002.
- Harris, I. *et al.* (2020) «Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset», *Scientific Data*, 7(1), pp. 1-18. doi: 10.1038/s41597-020-0453-3.
- He, Y. y Beighley, R. . (2008) «GIS-based regional landslide susceptibility mapping: a case study in southern California», *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(March), pp. 613-628. doi: 10.1002/esp.
- Hearn, G. J. y Hart, A. B. (2019) «Landslide susceptibility mapping : a practitioner's view», *Engineering Geology and the Environment*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. doi: 10.1007/s10064-019-01506-1.
- Igwe, O. *et al.* (2020) «GIS-based gully erosion susceptibility modeling, adapting bivariate statistical method and AHP approach in Gombe town and environs Northeast

- Nigeria», *Geoenvironmental Disasters*. *Geoenvironmental Disasters*, 7(1). doi: 10.1186/s40677-020-00166-8.
- Komac, M. (2006) «A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia», *Geomorphology*, 74(1-4), pp. 17-28. doi: 10.1016/j.geomorph.2005.07.005.
- Laraque, A. *et al.* (2004) «Sediment yields and erosion rates in the Napo River basin: An Ecuadorian Andean Amazon tributary», *IAHS Publication*, (288), pp. 220-225.
- Lee, S., Choi, J. y Min, K. (2004) «Probabilistic landslide hazard mapping using GIS and remote sensing data at Boun, Korea», *International Journal of Remote Sensing*, 25(11), pp. 2037-2052. doi: 10.1080/01431160310001618734.
- Lee, S. y Min, K. (2001) «Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea», *Environmental geology*. Springer, 40(9), pp. 1095-1113. doi: 10.1007/s002540100310.
- MAE (2014) *Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental, Igarss 2014*.
- Mallick, J. *et al.* (2018) «GIS-based landslide susceptibility evaluation using fuzzy-AHP multi-criteria decision-making techniques in the Abha Watershed, Saudi Arabia», *Environmental Earth Sciences*. Springer Berlin Heidelberg, 77(7), pp. 1-25. doi: 10.1007/s12665-018-7451-1.
- Mindiola, E. y Toulkeridis, T. (2019) «El Rol De Las Fuerzas Armadas En La Gestión Y Prevención De Riesgos: Logros Y Retos», *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*, IV(4), pp. 43-70.
- Nicu, I. C. y Asăndulesei, A. (2018) «GIS-based evaluation of diagnostic areas in landslide susceptibility analysis of Bahluieț River Basin (Moldavian Plateau, NE Romania). Are Neolithic sites in danger?», *Geomorphology*. Elsevier B.V, 314(2017), pp. 27-41. doi:

10.1016/j.geomorph.2018.04.010.

Nilsen, T. H. *et al.* (1979) *Relative slope stability and land-use planning. Selected examples from the San Francisco Bay region, California., US Geological Survey Professional Paper 994.*

Núñez del Arco, E. (2003) *Geología del Ecuador.*

Pourghasemi, H. R. *et al.* (2018) «Analysis and evaluation of landslide susceptibility: a review on articles published during 2005–2016 (periods of 2005–2012 and 2013–2016)», *Arabian Journal of Geosciences*. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(9). doi: 10.1007/s12517-018-3531-5.

Raghuvanshi, T. K., Ibrahim, J. y Ayalew, D. (2014) «Slope stability susceptibility evaluation parameter (SSEP) rating scheme - An approach for landslide hazard zonation», *Journal of African Earth Sciences*. Elsevier Ltd, 99(PA2), pp. 595-612. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2014.05.004.

Rivadeneira, F. *et al.* (2007) *Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador.*

Saaty, T. L. (1980) «The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation: McGraw-Hill», *New York.*

Van Westen, C. J. (1997) «Statistical landslide hazard analysis. ILWIS 2.1 for Windows application guide», *ITC Publication*, 2, pp. 73-84.

Zumpano, V. *et al.* (2014) «A landslide susceptibility analysis for Buzău County, Romania», *Romanian Journal of Geography*, 58(1), pp. 9-16.